

榛名二ツ岳渋川テフラ(Hr-FA)噴火時の火碎流が 古墳時代建築物に与えた衝撃力の推定

— 金井東裏遺跡 1号掘立柱建物倒壊痕跡からの検討 —

亀山 ひろみ¹⁾・若井 明彦²⁾・杉山 秀宏³⁾

¹⁾群馬大学大学院理工学府博士前期1年 ²⁾群馬大学大学院理工学府 ³⁾(公財)群馬県埋蔵文化財調査事業団

はじめに

- 1. 榛名火山の噴火と金井東裏遺跡
- 2. 1号掘立柱建物について
- 3. 検討の手法

4. 旧表土の物性値の推定

- 5. 掘立柱建物に作用した衝撃力の推定
- 6. 火碎流の力学条件についての考察

まとめ

— 要 旨 —

本稿は、榛名火山の古墳時代の噴火で発生した火碎流により被災した群馬県渋川市金井東裏遺跡に関する建物の倒壊のデータを使用して地盤工学に基づく三次元解析を行い、火碎流の衝撃力を推定するものである。これにより今まで、具体的なイメージが湧かなかった火碎流の衝撃の度合いについて、推定ではあるが数値データが与えられることによりイメージを持つことが可能となる。

金井東裏遺跡は、6世紀初頭の榛名二ツ岳渋川テフラ(Hr-FA)の噴火の際に発生した、数度にわたる火碎流によって壊滅的な被害を受けている。1号掘立柱建物は初期段階の火碎流(S_3)によって倒壊し、その柱穴は火碎流の流下方向にゆがみ、地盤変形を生じている。本研究では、この倒壊時の地盤変形をもたらした火碎流(S_3)について、1号掘立柱建物の柱穴の土層断面、エレベーション等の図面による倒壊のデータと、土質試験等によって得られた地盤の強度等のデータから、地盤工学に基づく三次元解析を行い、火碎流(S_3)の衝撃力を推定する。

その結果、柱穴と同規模の変形が生じる際に掘立柱建物に作用する力積は7.3～14.5kNsであると推測される。この値は、今回の解析で設定した条件下においては、質量250～500kgの物体が初速度30m/sで衝突した際の力積に相当するものである。ただし、この衝突物の質量、速度が直接火碎流(S_3)のものと等価とはいえないことに注意する必要がある。また、掘立柱建物に作用する衝撃力のみに着目しているため、実際の火碎流全体が与えることができる衝撃力はより大きなものと考えられる。

キーワード

- 対象時代 古墳時代
- 対象地域 渋川市 金井東裏遺跡
- 研究対象 掘立柱建物 火碎流衝撃力

はじめに

小札甲を着たままの状態で人物が発見されるなど、古墳時代に榛名火山で発生した火碎流で被災した金井東裏遺跡からは、火碎流により倒壊した建物がいくつか発掘調査された。ただ、それら被災建物の構築材は流されてしまつたか、腐朽してしまつていて、ほとんど遺存していない。建物の痕跡から、火碎流の衝撃力は、相当なものであったことが推測できるが、具体的にどの程度の力なのかは分っていない。そこで、本稿では良好なデータが残る遺構から、どの程度の衝撃力があったのかを土木工学の分析に基づき想定する。

倒壊した建物の中で、衝撃力を推定できるデータを採取できたのが1号掘立柱建物である。ここでは、1号掘立柱建物の柱の倒壊に伴う、柱穴の変形のデータを使用して、地盤工学による三次元解析による火碎流の衝撃力の推定を行う。この火碎流の衝撃力の推定により当時の火碎流がどの程度のものであったのかを想定数値で示し、そのことで、その衝撃力について具体的なイメージを持つことができるであろう。

まず、榛名山の火山噴火と火碎流の衝撃力を推定するデータを提供する1号掘立柱建物についての説明を杉山が行い、1号掘立柱建物のデータに基づく衝撃力の三次元解析を、亀山・若井が行い、最後に三者で今回の分析で分かったことを記す。

1. 榛名火山の噴火と金井東裏遺跡

榛名山二ツ岳火口付近では、古墳時代後期に大規模な噴火が2回発生した。そのうちの最初の爆発に伴う降下火山灰と火碎流により、給源北東8.5kmに位置する金井東裏遺跡は被災している。6世紀初頭に発生した噴火では、榛名二ツ岳渋川テフラ(Hr-FA)と呼ばれるテフラ



第1図 榛名山二ツ岳と金井東裏遺跡の位置
A 榛名山二ツ岳 1 金井東裏遺跡

2 中筋遺跡 3 黒井峯遺跡 4 白井・吹屋遺跡群
(国土地理院 20万分の1 地勢図「長野・宇都宮」)

が北東～南東方向に降下し、山麓一帯を数度の火碎流が襲った。さらに山麓に堆積したテフラが降雨により流れ出した火山泥流も発生している(早田1989など)。噴火の季節は、火山灰に覆われた火山灰降下直前の田で、田植えの最中として初夏と推定されている。(原田・能登1985)^{註1)}

噴火に伴うテフラは現在、便宜的にS₁～S₁₅に区分されている(早田2006)。最初の噴火はマグマと水が接触して起こる水蒸気マグマ爆発で、火山灰が球状の塊や泥雨となって降り注いでいる(S₁)。その後小規模な火碎流が噴出し、東側山麓に堆積した(S₃)。この火碎流が甲を着た古墳人々やムラを襲い全滅させたもので、1号掘立柱建物もこの火碎流により倒壊したと考えられている(杉山・桜岡他2014)。その後の一連の水蒸気マグマ爆発について、大規模な火碎流(S₇)が発生した。この火碎流により、完全にムラは埋め尽くされてしまった。この火碎流は高速で、東麓一帯のみならず、赤城山西麓～子持村南麓に至る広範囲を襲つたものである(早田2006)。金井東裏遺跡で確認される火山噴出物は、おもにS₁、S₃、S₇と考えられており、衝撃力を推定するのは、このうちの火碎流(S₃)である^{註2)}。

2. 1号掘立柱建物について(第2・3図)

1号掘立柱建物は、調査地9区の中央部、境界で区画された屋敷地内の3棟(竪穴住居・平地建物・掘立柱建物)の建物のうちの1棟である。床面から約100個の赤玉が出土した。焼土の痕跡は無く、火を使用している様子はうかがえない。遺構の性格は、火どころが無く、多数の赤玉が床面に安置されている所から、作業場か乾燥場の可能性を考えている。

建物のデータを上げる。柱間1.6mの2間×2間の方形建物で、柱総数は8本である。平面積は、10.2m²である(第2図-1)。S₁降下火山灰の上を歩いて1号掘立柱建物に入る多数の足跡から、入口は南西にあることが分かった。調査途中の段階で保存の方向で調整が行われた結果、調査も一部に留めることになった。そのため、P1～P8まである柱穴の内、火碎流で不明瞭になったP4以外に、P2・6～8の柱穴の調査を途中で中止し、P1・3・5の3本のみ完掘した。完掘した柱穴は、深さ60～65cm、下底幅20～30cmである。

うち、P1(第2図-1・3)は、平面でみると、火碎流(S₃)により、柱が北東方向に倒れて床面に柱の窪みの痕跡が長60cm、深さが基部で10cmほど残り柱の傾斜60°である。柱穴内の土層の断面図から、柱が倒れた後に柱根が腐朽して残った土層から柱の倒壊の様子が分かる。

P3(第2図-1・3)は、柱が北東方向に倒れて床面に柱の窪みの痕跡が長110cm、深さが基部で5cmほど残り柱の傾斜45°である。柱穴内の土層断面からは、柱根

が倒壊により、柱穴の壁を崩している状況が窺える。

P5(第2図-1・2)も、柱が北東方向に倒れて床面に柱の窪みの痕跡が長50cm、深さが基部で15cmほど残り柱の傾斜50°である。特に柱が倒壊する際に、倒壊方向の反対側に柱穴の壁を抉るようにしており、その下からの圧力で地面上の土も盛り上がっている状況である。

P1・3・5とともにそれぞれ、火碎流に相対した位置の違いにより、倒壊状況が異なっている。

次に、衝撃力推定のための家屋の想定復元を行う。まず、柱である。柱材は腐朽してしまい材質は不明である。柱の材は、金井東裏遺跡の5世紀後半の焼失竪穴住居の炭化材の材質鑑定で分った例では、クリとコナラが多い。また、同じHr-FA火碎流で被災した中筋遺跡では、コナラ・クヌギ・クリを主に使用している(大塚1988・1993)ので、この建物でもそれらのいずれかを使用した可能性が高い。柱の太さは、柱腐朽後の土層断面や、柱穴底径などから、径10cmと想定した。また、柱の長さは、柱穴底まで柱根が到達していると考えて、地面から深さ65cmとし、地上に出ていている部分を160cmとして全長は225cmと想定している。

床も含めた建物構造であるが、赤玉が約100個床面に置かれていることや、総柱でないことなどから、高床建

物(倉庫)と考えず、平地式の掘立柱建物とした。赤玉が東に、柱間をまたいで出ているので、あるいは東面には壁が無い形態である可能性もあるが、分析モデルを単純化するということから、壁は四周を巡っていると想定した。壁材についても情報が無いが、板材で壁を構成したとは考えられず、中筋遺跡の平地式建物にあるような、草壁状のものを想定した。

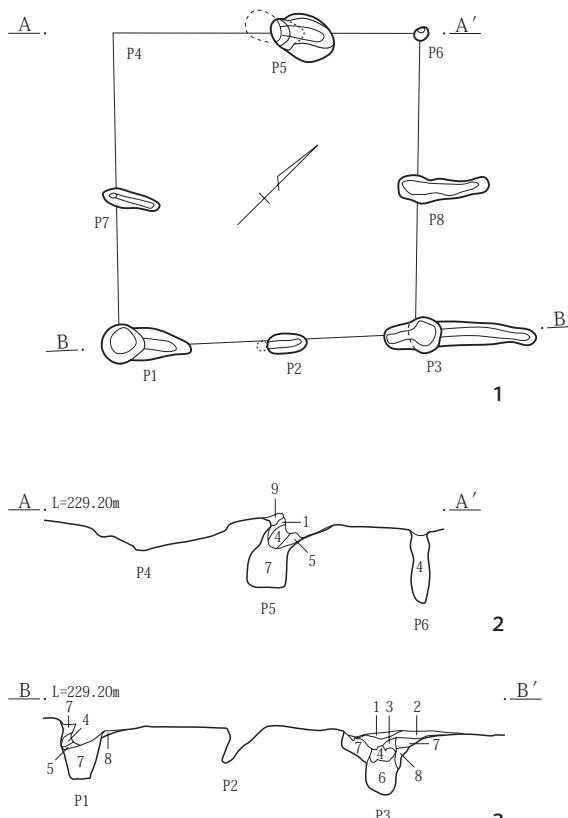
屋根構造及び屋根材についても、一切情報が無い。黒井峯遺跡のように軽石の堆積状況や雨落溝などにより、屋根構造が分かる場合があるが、当建物ではそのような情報を得ることができず、最も単純な、茅葺の切妻造の屋根(屋根角度45°)を想定した。また、入口が南西にあるので、平入りの建物として、東西に棟を持つ形とした。

最終的に想定した住居の形態は、柱径10cm、地面からの柱の高さ160cmで、東西に主軸を持ち、南西に入口を持つ、茅葺草壁の平入り切妻造掘立柱建物とした。

火碎流は、溝状の衝撃痕跡から、西から東に向けて建物の妻方向の西面に向かってほぼ直線状に直撃したという想定で、衝撃力の分析を行うこととする。

3. 検討の手法

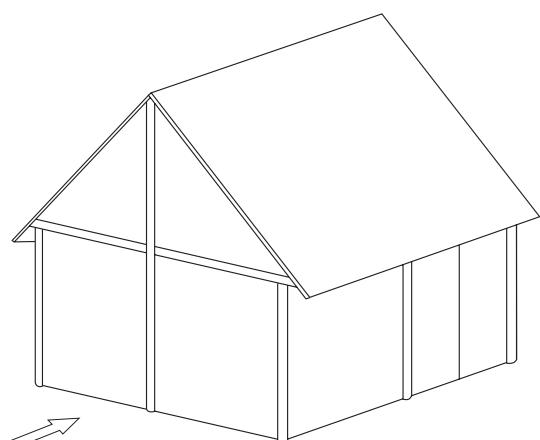
金井東裏遺跡の集落が火碎流に覆われた状況からも、甚大な被害であることは容易に推定される。火山が身近



第2図 1号掘立柱建物平面図・断面図 (1/80)

1号掘立柱建物 土層注記

- 1 S₃上部層中心層
- 2 S₃上部層と灰黄褐色土(10YR4/2)まじる。
- 3 灰黄褐色土(10YR4/2)
- 4 S₃下部層中心層、一部上層土まじる。
- 5 S₃下部層と灰黄褐色土(10YR5/2)まじる。
- 6 S₃下部層と灰黄褐色土(10YR4/2)まじる。しまりやや弱。
- 7 灰黄褐色土(10YR4/2)ローム土5%、S₃下部層5%含む。しまりやや弱。
- 8 灰黄褐色土(10YR4/2)ローム土20%含む。しまりやや弱。
- 9 灰黄褐色土(10YR4/2)ローム土5%含む。炭化粒極少量含む。



第3図 1号掘立柱建物復元図 (1/80)

である我が国においてその被害の検討、把握は非常に重要な。しかし、火碎流自体の持つ危険性もあり、その挙動を把握することは困難である。1992年の雲仙普賢岳火碎流の物理計測(谷口他 1996)は数少ない観測事例の一つであり、破壊力が大きい本体部を避け、サージの風圧を計測している。このような観測事例が少ない中で、火碎流の挙動を推定しているのが現状である。

本研究では、金井東裏遺跡に残されている地盤変形をもとに、掘立柱建物にどの程度の力が作用したのかという点に着目し、火碎流(S_3)の威力を簡易的に推測することを試みる。火碎流が掘立柱建物に到達した際、一瞬のうちになぎ倒したと仮定すると、衝撃力として作用したとみなすことができる。すなわち、火碎流の威力を「ある一定の質量および速度を持つ物体が衝突する際に作用する力」として簡易的に扱うことが可能となる。この条件のもと、三次元動的FEM解析によって、ある一定速度および質量の物体が、掘立柱建物を模擬したモデルに衝突した際の、地盤(以降、旧表土と表記する)の挙動を再現し、火碎流が与える衝撃力について検討する。

4. 旧表土の物性値の推定

4-1. 旧表土に実施した各種土質試験

解析で用いる物性値を算出するため、旧表土の土質試験を実施した。旧表土の周辺を掘削し^{註3)}、乱れの少な

い状態で一辺約30cm四方のブロック試料(第4図)と50cm³の試料(第5図)を採取した。土質試験により得られた各基本物性値を第1表に示す。

粒度試験により得られた粒径加積曲線を第6図に示す。細粒分含有率(粒径75μmでの通過質量百分率)が57%と、細粒分を多く含む高液性限界のシルトである。

4-2. おもりの落下実験(旧表土の動的抵抗力の把握)

旧表土の動的抵抗力を把握するため、ステンレス鋼のおもりを自由落下させ、旧表土の沈下量を測定した。実験に使用したおもりの条件を第7図に示す。

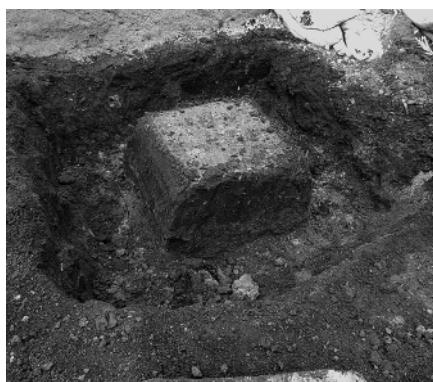
実験結果を第2表に示す。おもりが接地する直前の鉛直下向きの速度vは、空気抵抗を無視し、力学的エネルギー保存則より、次式から簡易的に算出した。

$$v = \sqrt{2gh}$$

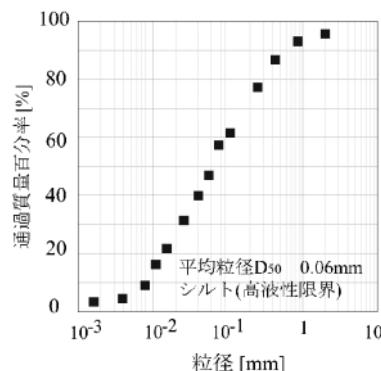
ここに、g: 重力加速度、h: 落下高さである。

4-3. 旧表土の物性値推定のための逆解析

旧表土の物性値を把握するため土質試験と落下実験を行ったが、解析する上で未知の物性値が複数存在する。これらの値を推定するにあたり、実験で得られた物性値や経験式(Hara et al. 1974)を用いて、物性値を4通りに設定し、落下実験の再現解析(逆解析)を行う。解析結果と落下実験結果とを比較し、妥当性の高いと思われる



第4図 ブロック試料



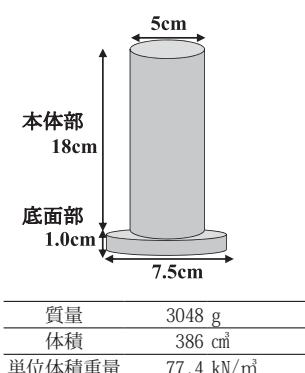
第6図 粒径加積曲線

第1表 旧表土の物性値

最大密度	ρ_{\max}	1.06 [g/cm ³]
最小密度	ρ_{\min}	0.81 [g/cm ³]
湿潤密度	ρ_t	1.23 [g/cm ³]
乾燥密度	ρ_d	0.87 [g/cm ³]
土粒子密度	ρ_s	2.60 [g/cm ³]
間隙比	e	1.99
液性限界	w_L	109.6 [%]
塑性限界	w_p	63.1 [%]
塑性指数	I_p	46.5
自然含水比	w	68.9 [%]



第5図 5 cm³の採土円筒



第7図 おもりの条件

第2表 落下実験結果値

	落下高さ [cm]	沈下量 [cm]	接地直前の速度 [m/s]
No. 1	42	0.59	2.9
No. 2	84	0.93	4.1
No. 3	117	1.75	4.8

ものを選出し、本解析で用いる旧表土の物性値とする。

第8図に逆解析に用いる有限要素(二次要素)分割図を示す。旧表土におもりが接している状態を表し、x軸、y軸について対称性を利用した。また、衝突後におもりの運動方向が間もなく反転し、やがて剥離するような力学条件を表現するため、おもりと旧表土が接触する面にはインターフェイス要素(薄層)を設けた。

解析で使用する物性値を第3表に示す。おもりは弾性体とし、一般的なステンレス鋼の値を参考とした。逆解析を行うにあたり、第4表のように4ケースの条件を設けた。旧表土の構成則はUWモデル(Wakai・Ugai 2004)である。

また、おもりには各ケースともに鉛直下向きに $v=4.8\text{m/s}$ の初速度を与えて解析をする。これは、落下実験から算出した接地直前の速度であり、このときの地表面の沈下量は 1.75cm であった。今回は実験ケースのうちもっとも沈下量の大きいケースに着目した。実験での沈下量と、解析によって得られた沈下量を比較することで、仮定したケース群の妥当性を検討する。

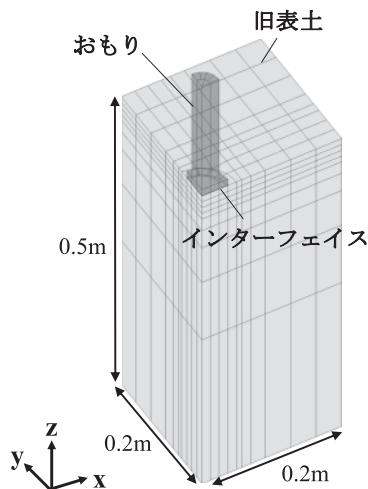
上記の各解析ケースの結果について記述する。第9図に示す点A～Dの4点について、算出された沈下量を第5表に示す。各ケースの沈下量について、粘着力と土の強度は比例するため、粘着力が大きいケースでは沈下量は小さくなる。これらの結果の比較から、実測にもっと

も近い沈下量として、ケース3を本解析で用いる旧表土の物性値として採用した。

5. 掘立柱建物に作用した衝撃力の推定

5-1. 解析条件

実験と解析から推定した地盤の物性値を用いて、掘立柱建物に作用した衝撃力について検討する。前述のように、持続的に通過する火砕流の先端部が掘立柱建物に到達し、間もなく建物が引き倒されたという仮定に基づい



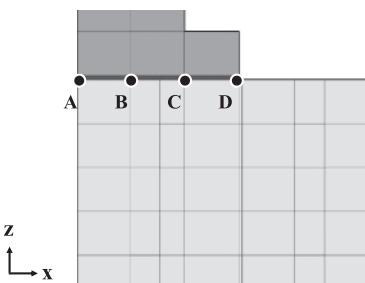
第8図 落下実験の逆解析に用いる有限要素分割図

第3表 落下実験の逆解析に用いる物性値

材料	モデル	ヤング率 $E[\text{kN/m}^2]$	ポアソン比 $\nu [-]$	粘着力 $c[\text{kN/m}^2]$	内部摩擦角 $\phi [\text{deg}]$	単位体積重量 $\gamma [\text{kN/m}^3]$	Rayleigh減衰	
							α	β
おもり	線形弾性	$2.0\text{E}+8$	0.3	-	-	77.4	0.172	0.002
インターフェイス	接触時には線形弾性 剥離時には剛性ゼロ	旧表土と同値	0.3	-	-	$1.0\text{E}-20$	0.172	0.002

第4表 各ケースでの旧表土の材料定数

ケース	モデル	ヤング率 $E[\text{kN/m}^2]$	ポアソン比 $\nu [-]$	粘着力 $c[\text{kN/m}^2]$	内部摩擦角 $\phi [\text{deg}]$	履歴パラメータ $b\gamma_{60}$	n	Rayleigh減衰	
								α	β
1	UWモデル	1.8E+4	0.3	13.8	0	2.2	1.6	14.4	0.172
2		2.1E+4							
3		2.4E+4							
4		2.6E+4							



第9図 地表面沈下量の出力点

第5表 各ケースでの地表面沈下量

	粘着力 $c[\text{kN/m}^2]$	各点での沈下量[cm]			
		A	B	C	D
ケース1	13.8	2.29	2.44	2.43	2.31
ケース2	16	1.95	2.08	2.05	1.93
ケース3	18	1.63	1.74	1.75	1.71
ケース4	20	1.47	1.57	1.61	1.55

て解析を行う。解析では、この火砕流の作用のある飛翔物体(以降、衝突物と記す)による衝突に置き換え、その衝撃力について考察する。

推定されている掘立柱建物の復元図(第3図)をもとに、第10図のように掘立柱建物に衝撃力が作用する際の有限要素分割図を作成した。旧表土上に掘立柱建物があり、柱は一辺10cmの正四角柱^{註4)}に簡略化し、下端65cmが地中に埋められている。掘立柱建物の一面に一樣の力が作用するものと仮定し、衝突物には初速30m/s^{註5)}を与える。屋根の張り出しの部分は計算結果への影響が小さいものとみなし、簡略化した。また、対称性を利用し、掘立柱建物の半面のみで有限要素を作成した。

解析に使用する物性値を第6表に示す。衝突物と掘立柱建物は弾性体とし、旧表土は前述のように採用した物性値を用いた。柱は立木の状態でのスギ^{註6)}のヤング率(藤本・田所2008)を参考とした。また、壁・屋根は、材の形状や強度等を推定することが困難であるため、今回は厚さ10cmとし、衝突物と接する面での壁の曲げ剛性が、柱1本のものと等価となるようにヤング率を決定した。

衝突物については、壁・屋根と等しい値のヤング率を与えた。衝突物は、火砕流の作用を模擬するために設定したため、その質量とヤング率には決まった値ではなく、それぞれの値を変えると、結果として作用する力積の大きさが様々に変化する。なお、予備検討の結果、作用した力積の大きさが等しければ変形結果はほとんど変わらないことが示されているため、今回は作用した力積のみに着目することで、衝突物の質量とヤング率は任意の値を与える。衝突物の単位体積重量は、掘立柱建物一棟に対する衝突物の質量が250、500、1000kgとなるように与え、3通りの条件で各解析を行った。作用する力積を大きく左右する要因が質量であることから、2倍ずつ変化させた値とした。

5-2. 解析結果

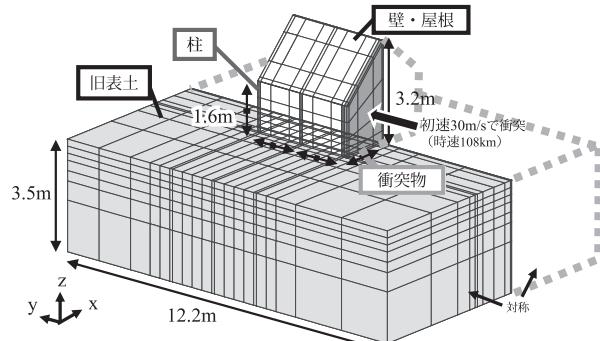
第11図に各解析ケースにおける、せん断ひずみ図、残留変形図(等倍率)、衝撃力の時刻歴を示す。上段から順に、衝突物の質量が250、500、1000kgの場合の解析結果を示している。せん断ひずみ図と残留変形図の右向きを衝突の方向(y軸正の向き)としており、これらは柱が3

列設置された断面を示している。また、衝撃力の時刻歴は、各時刻における衝突面に作用する衝突方向の力であり、今回は計算の簡単化のため並進力にのみ着目していることに留意されたい。ここでは、衝撃力の積分値すなわち力積が、掘立柱建物に作用した力の合計であると考える。

残留変形図は、点線が衝突前、実線が衝突終了後を示している。衝突物に対して前列の柱は抜け上がり、後列の柱は下方に押し込められる傾向にある。掘立柱建物の中心について時計回りの力を受けている。衝突方向での柱穴の断面図(第2図-1・3)にて、P1とP3を比較すると、衝突面に対して後列であるP3の方が、前列となるP1よりも柱穴の下端が深い位置であることが分かる。このため、実際に被害を受けた際にも、同様の挙動を示した可能性が示唆される。一方で、変形図のみでは、柱の背面の地盤が破壊され、ゆるんで陥没する様子がわかりにくないので留意する必要がある。

次に、せん断ひずみ分布をもとに、陥没部分に対応する主働破壊領域について検討する。ひずみの大きい範囲は応力が集中しており、ある値(破壊時せん断応力)まで達すると、地盤が塑性化し、破壊及び大きな変形が発生する可能性が高いと考えられる。

なお、旧表土が破壊するときのせん断ひずみについては、以降の手順で判断した。第12図に旧表土の物性値を用いた繰り返し載荷によるせん断応力-ひずみ履歴曲線



第10図 衝撃力が作用する際の有限要素分割図

第6表 衝撃力推定の解析に用いる材料定数

材料	モデル	ヤング率 E [kN/m ²]	ポアソン比 ν [-]	粘着力 c [kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ [deg]	単位体積重量 γ [kN/m ³]	Rayleigh減衰	
							α	β
衝突物	線形弾性	4.5E+5	0.3	-	-	m=250のとき 3.37 m=500のとき 6.7 m=1000のとき 12.3	0.172	0.002
インターフェイス	接触時には線形弾性 剥離時には剛性ゼロ	4.5E+5	0.3	-	-	1.0E-20	0.172	0.002
柱	線形弾性	7.0E+6	0.3	-	-	7	0.172	0.002
屋根・壁	線形弾性	4.5E+5	0.3	-	-	2	0.172	0.002
材料	モデル	ヤング率 E [kN/m ²]	ポアソン比 ν [-]	粘着力 c [kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ [deg]	履歴パラメータ	単位体積重量 γ [kN/m ³]	Rayleigh減衰
		b yG0	n				α	β
旧表土	UWモデル	2.4E+4	0.3	18	-	2.2 1.6	14.4	0.172 0.002

の例(UWモデル)を示す。モール・ケーロンの破壊規準に基づく、旧表土の破壊時せん断応力は $\tau_f = c = 18.0 \text{ kN/m}^2$ である。安全率を考慮し、破壊時せん断応力の95%(第12図中点線: $\tau = 17.1 \text{ kN/m}^2$)程度に達するとき、すなわち旧表土のせん断ひずみが約0.035程度以上に達するとき塑性化が顕著になると判断し、第11図のせん断ひずみの濃淡スケールの黒色閾値を0.035として描画してある。

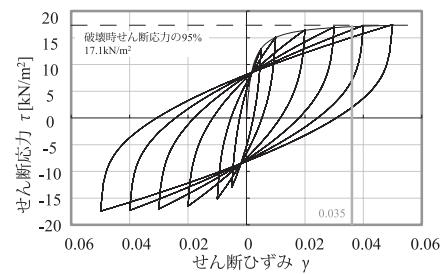
柱穴の調査では柱の傾斜が分かっているものも一部あるが、柱穴自体は、柱に押されただけでなく火碎流が削り取るなど様々な要因で形成されている可能性があるため、柱の変形だけでは評価することが難しい。そこで、今回は地盤の破壊された範囲に着目し、柱穴と比較した。実測されている柱穴の断面図(第2図-1・3)とせん断ひずみ図による破壊した地盤の範囲を比較すると、衝突物の質量が250~500kgの場合、すなわち約7.3~14.5kNsの力積が作用したとき、柱穴と同規模の変形が生じるものと推定される。ただし、今回の解析においては、火碎流の作用を飛翔物体の衝突という簡易なモデル化により表現しているので、上述の質量の数値そのものは物理的意味を有しておらず、ここでは掘立柱建物に作用した力積の値のみに着目すべきことに注意が必要である。

6. 火碎流の力学条件についての考察

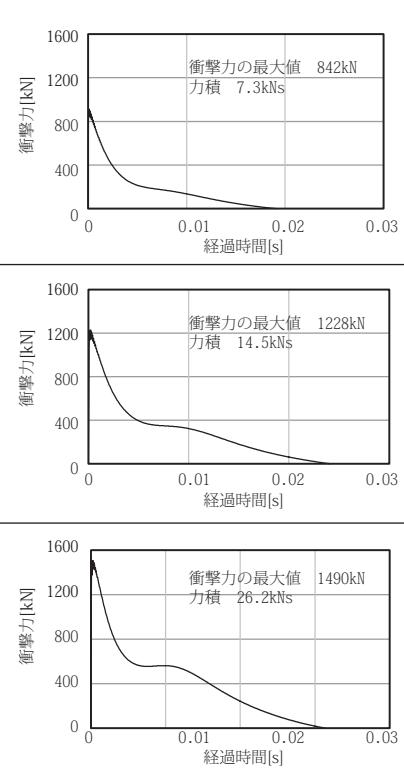
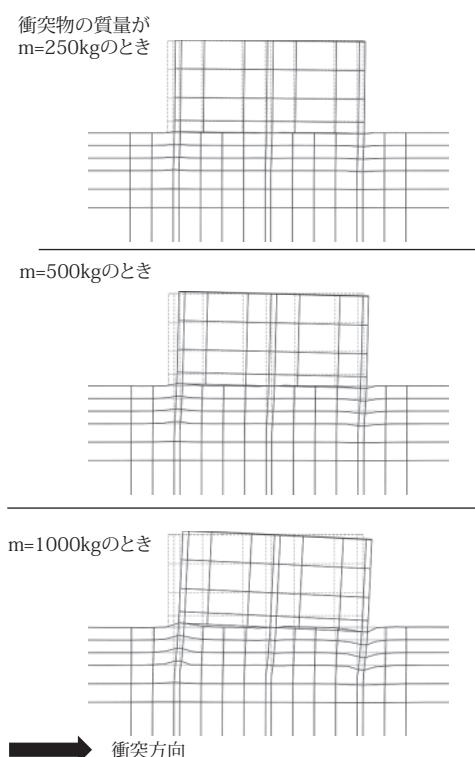
解析では、ある物体が瞬間に力を与える衝撃力に着目してきたが、実際には火碎流は流体ととらえられている。解析で推定された力積に基づき、火碎流のパラメータについて考察する。

一定速度の流体中の物体が、流体から受ける力(流体抵抗力 F)は次式で表される。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2$$



第12図 旧表土の物性値を用いて描いた
UWモデルによるせん断応力-ひずみ履歴曲線の例(実線)
(点線:破壊時せん断応力の95%の値)



第11図 衝突物の質量を変化させた各解析ケースにおける
残留変形図(左列)、せん断ひずみ図(中央列)、衝撃力の時刻歴(右列)

ここに、 C_D ：抵抗係数、 ρ ：流体の密度、 S ：物体の代表面積、 V ：流体と物体との相対速度である。

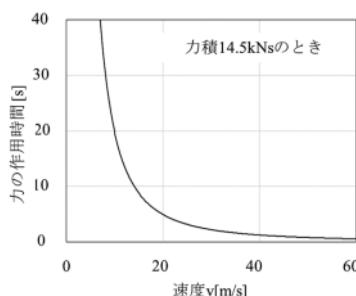
ここで、作用する力を流体抵抗力としてとらえたとき、解析で推定された力積を発揮しうる火碎流の条件について考える。今回想定した掘立柱建物の形状から、 $C_D=1.12$ 、 $S=8.1\text{m}^2$ とする。火碎流の密度は $0.84\sim2.4\text{kg/m}^3$ との推定値が報告されているため(石川・山田 1995)、中央値である 1.62kg/m^3 とすると、速度と力の作用する時間の関係は第13図のように得られる。

実際に到達した火碎流の速度を $V=10\sim30\text{m/s}$ と仮定すると、掘立柱建物に 14.5kNs の力積を与えるためには $2\sim20\text{s}$ 力が作用したこととなる。ただし、これはあくまで火碎流が作用してから草壁が吹き飛び、柱が折れるなどして掘立柱建物が断面を維持できなくなるまでの時間であり、火碎流自体の継続時間はさらに長いという可能性は否定できない。

また、被害痕跡から推定される、倒壊した柱の傾斜はおよそ $45\sim60^\circ$ であるが、解析の結果では同様の傾斜が得られなかった。このような違いがみられることについて、以下の要因が考えられる。①実際にはある一定時間をかけて徐々に引き抜かれており、柱の下端が少し抜かれた状態では最初の状態より、水平に倒される際の水平剛性が小さくなかったこと、②掘立柱建物の中を吹き抜ける風の風圧によって、鉛直上向きの力が作用していたこと等の可能性がある。よって、瞬間的な力だけでなく、静的な力による変形等も検討することによって、より精度の高い推定の手法を確立することが望ましい。

まとめ

火碎流の被害痕跡に着目し、地盤の強度から火碎流の衝撃力を推定することを試みた結果、被害状況とおおよそ整合のとれる変形傾向が得られた。また、火碎流(S_3)が掘立柱建物に及ぼした衝撃力は $7.3\sim14.5\text{kNs}$ とみられる。これは解析で設定した条件下においては、質量 $250\sim500\text{kg}$ の物体が初速度 30m/s で衝突した際の力積に相当するものである。ただし、この衝突物の質量・速度が直接火碎流(S_3)のものと等価とはいえないことに



第13図 流体抵抗力に換算したときの速度と作用時間の関係

注意する必要がある。本検討では、火碎流の一部が掘立柱建物に及ぼした力積のみに着目したため、火碎流全体が与えることができる衝撃力はより大きなものであると考えられる。

また、今回は掘立柱建物の形状を茅葺草壁切妻造と仮定したが、実際の形状は判明していない。あらゆる可能性を考慮するためには、今後、異なる形状を想定した分析を行なうことが望まれる。

なお、榛名火山のテフラについては、早田勉博士にご教示いただいた。ここに記して御礼を申し上げる。

註

註 1)季節については、いくつかの見解がある。同じように初夏とする見解(坂口2013)以外に、秋とする考え方(大塚1985)もある。

註 2)実際には火碎流から派生した火碎サージ。Hr-FAのテフラについては、早田勉博士に同定作業を依頼し、その結果を参考に記述した。

註 3)1号掘立柱建物周辺は保存が決定し、旧表土土壤分析のための物性値を把握の土質試験と落下実験の為の資料採取は行えない。そこで、南側の調査区の地盤がほぼ同じ状況である7区で試料採取を行った。

註 4)実際の柱は樹木を切り出し、加工はされておらず、円柱形である可能性が高い。しかし、柱の断面形状による影響は少ないと考え、簡略化のため四角柱形として計算した。

註 5)雲仙普賢岳火碎流の観測速度が $8\sim37\text{m/s}$ との報告(宇井・隅田 1993・山田1994)を参考とし、今回は 30m/s とした。

註 6)本文中に記述したように、柱材にはコナラ・カエデ・クリを使用した可能性が高い。しかし、強度が計測されているものが、スギのデータしかなかったため、今回はスギの強度データを使用した。

引用参考文献

- 石川芳治・山田孝 1995「構造物に作用する火碎流流体力」『土木学会技術資料』VOL.37 No.1 pp.46-51.
 宇井忠英・隅田まり・大学合同観測班地質班 1993「メラビ型火碎流の発生過程—雲仙普賢岳第6ドームでの観測結果—」『火山』第38-2号 pp.45-52.
 大塚昌彦 1985「群馬県渋川市中村遺跡におけるミニ水田出土のイネモミ資料」『考古学研究』124 考古学研究会 pp.8-11
 大塚昌彦 1988「中筋遺跡(第2次)」pp.42-47.渋川市教育委員会
 大塚昌彦 1993「中筋遺跡(第7次)」pp.40-60.渋川市教育委員会
 坂口一 2013「榛名二ツ岳渋川テフラ(Hr-FA)・榛名二ツ岳伊香保テフラ(Hr-FP)およびそれらに起因する火山泥流の堆積時間と季節に関する考古学的検討」『第四紀研究』52-4 pp.97-109.
 杉山秀宏・桜岡正信ほか 2014「群馬県渋川市金井東裏遺跡の発掘調査概要」『日本考古学』38 日本考古学協会 pp.79-89.
 早田勉 1989「6世紀における榛名火山の2回の噴火とその災害」『第四紀研究』27 pp.297-312.
 早田勉 2006「古墳時代の榛名大噴火—火山灰からさぐる噴火のうつりかわり」『はるな30年物語』pp.54-66. かみつけの里博物館
 谷口宏充・中田節也・鎌田桂子・三軒一義・鎌田浩毅・松島健 1996「普賢岳火碎流の物理計測の試み」『月刊地球』号外15号 pp.112-117.
 Hara, A., Ohyta, T., Niwa, M., Tanaka, S. and Banno, T. 1974「Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils」『Soils and Foundations』Vol.14 No. 3 pp.1-12.
 Wakai, A., Ugai, K. 2004「A Simple Constitutive Model for The Seismic Analysis of Slopes and Its Applications」『Soils and Foundations』Vol.44 No. 4 pp.83-97.
 藤本 浩平・田所 賢一 2008「優良品種の選抜技術支援(次代検定林の材質調査)」『高知県立森林技術センター平成20年度研究成果報告書』pp.31-32.
 原田恒弘・能登健 1984「火山災害の季節」『群馬県立歴史博物館研究紀要』No.5 pp.1-21.
 山田孝 1994「火碎流の運動・堆積機構と災害防除に関する砂防学的研究」『北海道大学農学部演習林研究報告』第52巻 第1号 pp.22-84.